



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**UMĚLÝ ŽIVOT**

ARTIFICIAL LIFE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

František Weigl

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

RNDr. Jiří Dvořák, CSc.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	<b>František Weigl</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>RNDr. Jiří Dvořák, CSc.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Umělý život

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Systémy umělého života jsou tvořeny množinami elementárních prvků, jejichž vzájemné působení a spolupráce se na globální úrovni projevuje chováním, které lze interpretovat jako projev života. Příkladem jednoduchého modelu umělého života je Conwayova hra LIFE.

### Cíle bakalářské práce:

1. Charakterizovat problematiku umělého života.
2. Popsat vybrané softwarové modely včetně vhodných příkladů.
3. Implementace jednoduchého modelu a provedení experimentů.

### Seznam doporučené literatury:

AGUILAR, W. et al. The Past, Present, and Future of Artificial Life. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 1, 2014, 8 pages.

BEDAU, M. A. Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up. *TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol. 7, No. 11, 2003, pp. 505-512.

BELK, R. et al. Artificial Life. *Journal of Macromarketing*, 2020, Vol. 40, No. 2, 2020, pp. 221-236.

CSONTÓ, J. Umělý život. In: Mařík V. a kol. *Umělá inteligence (3)*. Praha, Academia, 2001.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou umělého života. První část poskytuje stručný přehled historie umělého života a současné dělení umělého života. Ve druhé části práce jsou popsány některé významné softwarové modely umělého života. Poslední část práce obsahuje jednoduché experimenty s vybraným celulárním automatem.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the issue of artificial life. The first part provides a brief overview of the history of artificial life and the current division of artificial life. The second part describes some important software models of artificial life. The last part of the work contains simple experiments with a cellular automaton.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Umělý život, celulární automat, umělá evoluce, Hra života

## **KEYWORDS**

Artificial life, cellular automata, artificial evolution, Game of Life





ÚSTAV AUTOMATIZACE  
A INFORMATIKY



2021

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

WEIGL, František. *Umělý život*. Brno, 2021. Dostupné také

z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135176>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Jiří Dvořák.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu závěrečné práce RNDr. Jiřímu Dvořákovi, CSc. za ochotu a spolupráci při psaní mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 22. 5. 2021

.....

František Weigl



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>UMĚLÝ ŽIVOT.....</b>	<b>17</b>
2.1	Historie umělého života.....	18
2.2	Současný přístup k umělému životu.....	19
2.3	Využití umělého života.....	21
2.4	Otevřené problémy umělého života.....	22
<b>3</b>	<b>SOFTWAREVÉ MODELY.....</b>	<b>23</b>
3.1	Von Neumannův CA.....	23
3.2	Hra života.....	23
3.3	Langtonovy Q-smyčky.....	26
3.4	Langtonův mravenec.....	27
3.5	Wolframův jednorozměrný CA.....	28
3.6	Reynoldsov model shlukování ptáků.....	30
3.7	Lindenmayerovy systémy.....	31
3.8	Želví grafika.....	32
3.9	Fraktály.....	34
3.10	Hromady písku.....	34
3.11	Chování mravenců.....	36
3.12	Umělá evoluce.....	37
3.13	Počítačové viry.....	38
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTACE JEDNODUCHÉHO MODELU.....</b>	<b>39</b>
4.1	Langtonův mravenec.....	39
4.2	Programové prostředí.....	40
4.3	Popis experimentů.....	41
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>51</b>



# 1 ÚVOD

Koncept umělého života, ač by se mohl zdát něčím novým, nás doprovází již od období antiky. Pod pojmem umělý život (dále jen AL – *artificial life*) si valná většina lidí vybaví robota nerozeznatelného od člověka nebo super inteligenci, která se snaží zničit svět, jak vyobrazuje spousta vědeckofantastických knih a filmů. Umělý život v současné době však ve většině případů slouží spíše k výzkumu a prohlubování znalostí lidstva o životě skutečném a to většinou v prostředí počítače. Jako další využití umělého života můžeme uvést optimalizaci struktur a procesů díky umělé evoluci. Význam umělého života ve společnosti však stále narůstá a nemusí se už jen jednat o počítačové simulace.

Toto téma se tak může zprvu zdát náročné na pochopení, avšak v této práci bylo snahou popsat umělý život a jeho aplikace tak, aby jeho vysvětlení bylo názorné a srozumitelné. Mnoho procesů umělého života má své zastoupení v přírodě a ty nebývají vždy složité a často bývají dle těchto jevů jednotlivé modely pojmenovávány.

V úvodní kapitole práce je detailněji popsán umělý život, jeho historie od antiky až po druhou polovinu 20. století, kdy dochází k výraznému rozvoji umělého života a to hlavně díky pokročilým technologiím, které umožnily lepší výzkum umělého života. Po historii následuje podkapitola o současném stavu poznání AL, jeho rozdělení v dnešní době a směry, kterými by se výzkum AL mohl vydat. Po této úvodní kapitole následuje kapitola, ve které jsou popsány významné softwarové modely umělého života. Většina modelů je realizována za pomoci celulárních automatů. Celulární automaty se zrodily již v období II. sv. války jako nápad na sebe-reprodukcii automatů inspirovaný biologickými organismy a hrají významnou roli na poli umělého života. Tyto automaty jsou využívány pro simulace přírodních procesů a hledání možností usnadnění některých složitě řešitelných problémů. Obsahem poslední kapitoly je provedení jednoduchých experimentů na konkrétním softwarovém modelu.





## 2 UMĚLÝ ŽIVOT

Koncepce umělého života může mít různé významy. Umělý život stejně jako umělá inteligence naráží na problém neexistence všeobecně přijaté definice. Christopher Langton umělý život původně definoval jako „*život vytvořený člověkem a ne přírodou*“, tedy studii člověkem vytvořených systémů napodobujících chování podobné životu, avšak později uvedl, že člověk a všechno co dělá je součástí přírody, a proto je tato definice nedostačující. Ve vztahu ke klasické umělé inteligenci je umělý život orientován opačným směrem. Zatímco se umělá inteligence snaží o přístup „shora dolů“, tj. program musí být v první řadě inteligentní a je na programátorovi, jak toho dosáhnout, umělý život se snaží vytvořit jen základní pravidla, která budou tak vhodně zvolena, že se složitější chování vytvoří po čase samo. [1, 4]

Umělý život sleduje dva cíle: prohloubit naše znalosti o přírodě a zdokonalit naše představy o umělých modelech a umožnit tak zlepšení jejich výkonnosti. Děje se tak abstrahováním základních dynamických principů, kterým podléhají biologické fenomény, realizací této dynamiky v jiném fyzikálním prostředí, například v počítači, a v jejím zpřístupnění novým typům experimentů. [4]

Umělá inteligence a umělý život mají k sobě nejbližší v typu programů nazvaných autonomní agent. To je program, který obsahuje nějaký druh vnímání okolního prostředí a návazně ovlivňuje vlastní stav, stav okolních agentů nebo prostředí samotné. V praxi se autonomní agenti využívají na úlohy jako řízení letového provozu nebo provozu továrny, kdy každý stroj má svého agenta starajícího se o dodávky energie, surovin a odvoz hotových výrobků. Toto využití je však stále ještě velmi nákladné. Za autonomního agenta může být považován i počítačový virus, ale v praxi se od agenta liší svojí jednoduchostí a tím, že má jen jeden hlavní cíl, a to rozšiřovat se. Mnoho aplikací umělého života vybavuje své organismy umělou neuronovou sítí, která slouží jako umělý mozek schopný natrénovat se z příkladů s předem zadaným výsledkem. [10]

Pokud se porovná biologický a umělý život, pak na úrovni tvarových a funkčních primitiv jsou rozdíly mezi umělým a přírodním velmi zřetelné, na úrovni součinnosti primitiv jsou již rozdíly mnohem menší a nakonec na úrovni jimi syntetizovaných procesů, jevů a struktur se rozdíly téměř úplně stírají. V praxi rozeznáváme tři základní formy syntetického přístupu:

- hardware: robotika a nanotechnologie,
- software: počítačové programy vykazující jisté rysy života,
- wetware: replikující se a vyvíjející se makromolekuly. [4]

## 2.1 Historie umělého života

Umělý život je interdisciplinárním výzkumným polem, na kterém se spojují poznatky biologů, filozofů, fyziků, počítačových vědců, chemiků, matematiků a inženýrů. Nejznámější jména průkopníků v tomto oboru jsou: John von Neumann, Norbert Wiener, John Horton Conway a Christopher Langton. Stručný přehled historie umělého života je zobrazen na obr. 1.

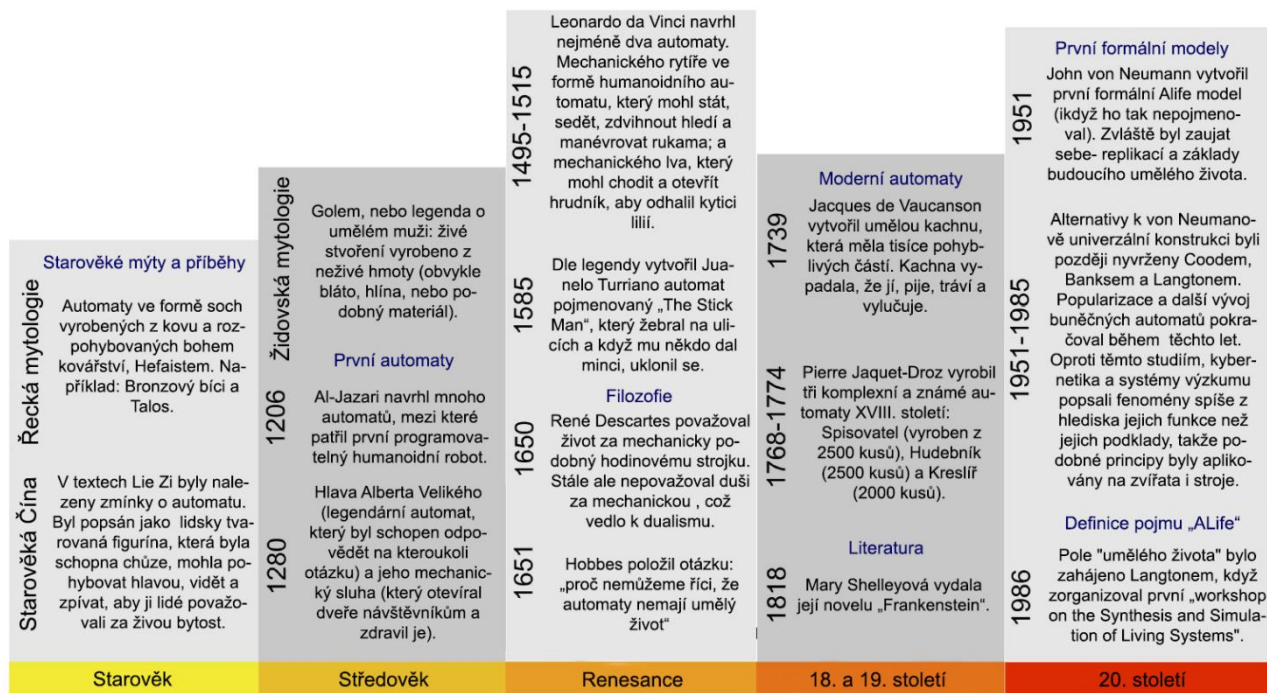
První zmínky o umělém životu pocházejí už z řecké mytologie, kde se můžeme setkat s oživými sochami vyrobenými bohem Héfaistem. Další zmínky pocházejí ze starověké Číny o lidsky tvarované figuríně, která byla schopna chůze, mohla pohybovat hlavou, vidět a zpívat. V židovské mytologii se pak objevuje známá postava golema, umělé bytosti vyrobené z neživého materiálu. [1, 3]

První programovatelný humanoidní robot byl vytvořen al-Jazarim společně s mnoha dalšími automaty. Z období středověku také pochází mosazná hlava Alberta Velikého, která byla schopna odpovědět na jakoukoliv otázku, a její mechanický služebník. [1, 3]

V období renesance se o pokrok na poli umělého života zasloužil Leonardo da Vinci, italský malíř a vynálezce, který stvořil přinejmenším dva automaty. Mechanického rytíře, který mohl stát, sedět, manipulovat s hledím přilby a nezávisle pohybovat pažemi. Dalším jeho výtvořem byl mechanický lev, který mohl chodit a otevřít hrudník, ve kterém měl kytici lilií. Dle legendy Juanelo Turriano stvořil automat jménem „*The Stick Man*“, který žebrol na ulicích, a když mu kolemjdoucí hodil minci, tak se mu uklonil. Během renesance došlo k pokroku taky na poli filozofie. René Descartes, francouzský filozof, matematik a fyzik, považoval život za mechanicky podobný hodinovému strojku, stále ale nepovažoval duši za mechanickou, což vedlo k dualismu. Anglický filozof Thomas Hobbes položil otázku: „*Proč nemůžeme říci, že automaty nemají umělý život?*“. [1, 3]

V 18. století Jacques de Vaucanson vytvořil umělou kachnu, která se sestávala z tisíce pohyblivých částí. Pierre Jaquet-Droz vytvořil tři nejkomplexnější automaty 18. století: Spisovatele, Hudebníka a Kreslíře. V 19. století vychází novela anglické spisovatelky Mary Shelleyové s názvem „*Frankenstein*“, která pojednává o stvoření umělého člověka. [1, 3]

Ve dvacátém století dochází k vytvoření prvních formálních modelů umělého života Johnem von Neumannem. John von Neumann se speciálně zajímal o sebe-replikaci a základní rysy života. Na jeho práci pak navazují Cood, Banks a Langton, dochází k popularizaci a vývoji celulárních automatů. Pole umělého života bylo plně otevřeno Christopherem Langtonem, když zorganizoval první workshop o syntéze a simulaci živých systémů v roce 1986. [1, 3]



Obr. 1 Souhrn historických kořenů umělého života [1]

## 2.2 Současný přístup k umělému životu

V současné době je přístup k umělému životu rozdělen do tří hlavních skupin. *Wet AL* se zakládá na syntéze živých systémů z biologických substancí, například vytváření umělých orgánů. *Hard AL* se zaměřuje na robotiku a hardwarově založenou implementaci reálného chování jako třeba rojová inteligence. *Soft AL* zahrnuje počítačové simulace digitálních modelů, které emulují reálné chování jako například evoluce a adaptace. Někdy se můžeme setkat také s pojmem *Transhumanismus*, který kombinuje všechny tři kategorie ve snaze prodloužit a vylepšit lidský život. [3]

I když je lidstvo stále vzdáleno od vytvoření kompletního umělého člověka, zvířete, či jiného živočicha biochemicky, bylo na poli *Wet AL* učiněno mnoho průlomů. Vědci dokázali vymodelovat DNA, dekodovat lidský genom a vyrobit umělý genom bakterie, umělé buňky a umělou DNA. Tyto pokroky jsou důležité nejen pro zdravotnictví a výrobu léčiv, ale také pro výrobu nových zdrojů paliv a nabízejí nové možnosti jak bojovat se znečištěním. *Wet AL* však s sebou nese hrozbu zneužití těchto technologií k výrobě nových biologických zbraní a nebezpečných genetických modifikací. Kritici často odsuzují vědce za to, že si až moc hrají na bohy, ale jak James Watson, spoluobjevitel DNA, řekl: „*If we don't play God, who will?*“. [3]

Ačkoliv má biochemický přístup ještě daleko do vytvoření humanoidního umělého života, dva elektromechanické přístupy jsou k tomuto cíli mnohem blíže.

Jedním z těchto přístupů k humanoidnímu umělému životu je vytvoření robotů. V dnešní době již humanoidní roboti existují, ale zatímco západní vědci se více soustřeďují na umělou inteligenci (UI) a roboty, kteří nevypadají lidsky, v Asii se vědci soustřeďují na vývoj humanoidních a zvířecích robotů a jejich integraci do společnosti. Toto rozdělení má mnoho důvodů, hlavními z nich je paralelita kultur. Na jedné straně je strach západní civilizace z toho, že se roboti stanou chytřejšími, silnějšími a mocnými a pokusí se svrhnout své stvořitele, jak pojednává mnoho knih nebo filmů. Oproti tomu lidé v Asii jsou k robotům shovívavější a ti se tak začali objevovat na různých pracovních pozicích. Velmi k tomu přispívá japonské náboženství šintoismus, podle kterého jsou všichni propojeni a duše je ve všem, dokonce i ve věcech člověkem vytvořených, což pomáhá vyhnout se nepodloženému strachu, který stále přetrvává na Západě. Druhým přístupem je modifikování a vylepšování lidí pomocí umělých částí na kyborgy. Pojem kyborg je odvozen z pojmu kybernetický organismus, který poukazuje na člověka s mechanickými, chirurgickými a farmakologickými vylepšeními, které by člověku pomohly přežít ve vesmíru. Tento přístup může být jedním z těch, které v budoucnu pomohou lidem držet krok se stroji, s umělou inteligencí a pomůže lidem dosáhnout dlouhověkosti. Kyborgové ovšem vyvolávají mnoho otázek jak etických tak filozofických a je mnoho směrů, kterými se můžeme při jejich tvorbě vydat, např.: překonat nedostatky přírody, následovat příkladu přírody a evoluce, nebo usilovat o to stát se „božskými“ bytostmi. Nejlepší alternativu k tomuto přístupu mohou nabízet z dlouhodobého hlediska nanotechnologie. [3]

Soft AL pracuje primárně skrze software. Například sebe-replikující se počítačový virus může být jistou formou AL. Jak již bylo zmíněno, západní vědci se více zabývají tvorbou různých UI, které otevírají nové možnosti. Rozlišují se dva druhy UI: slabá UI a silná UI. Slabá UI je tvořena systémy, které překonávají lidskou inteligenci a schopnosti v přesně definované oblasti. Se slabou UI se dnes můžeme setkat téměř kdekoli, od digitálních asistentů (např.: Siri, Cortana, nebo Alexa), přes inteligence schopné hrát komplexní hry (např.: Deep Blue, AlphaGo, AlphaStar) až po inteligence řídící dopravu. Silná UI by oproti tomu byla schopná řešit libovolný problém na lidské až nadlidské úrovni. Dalším požadavkem, který by měla silná UI splňovat, je nabytí vědomí. Co přesně je vědomí, není zcela definováno, ale platí, že UI by měla být schopna sebeuvědomění, vnímavosti nebo dokonce pocitů. Toto by někdo mohl nazvat duší. [3]

Poslední typ AL, transhumanismus, spojuje všechny tři předcházející přístupy. Jeho hlavní vizí, mimo jiné, je dosažení nesmrtelnosti díky přenesení vědomí do počítače, robota nebo syntetického klonu. O tomto tématu pojednávají například filmy *Transcendence* a *Tron*. Dalšími cíli transhumanismu je snaha žít zdravěji, být silnější a chytřejší, a to za pomoci technologie regenerace kmenových buněk, klonování, nanotechnologie, neuro-farmakologie, bioinženýrství a kryoniky. [3]

## 2.3 Využití umělého života

Umělý život je v dnešní době využíván v mnoha oblastech, a to nejen ve vědeckých kruzích. AL může být v praxi využit pro:

- Ovládání robotů: Využívá se evolučních výpočtů propojených s neurálními sítěmi a vyvíjejícím se ovládáním pro zlepšení chodu robotů a zefektivnění jejich práce.
- Počítačovou grafiku: Zde se využívá pro tvorbu virtuálních postav, generování 2D obrázků a animací. Kvůli obtížím při objektivním hodnocení produktu se k jejich návrhu používá interaktivní evoluční výpočet.
- Modelování přírodních jevů: Jedná se o modelování reálných přírodních jevů založené na celulárních automatech, ekologické modelování, modelování chování hejna a jeho aplikace a aplikace Lindermayerových systémů (více v kapitole 3.7). Využití Lindermayerových systémů je v této oblasti relativně velké. Byly rozšířeny do zemědělského modelování a využity pro vysvětlení vývoje fosilií.
- Herní průmysl: Zde se jedná hlavně o vývoj umělé inteligence za využití evolučních algoritmů pro hledání realistického modelu lidského chování. [9]

Toto je ovšem jen několik využití AL, se kterými se můžeme setkat. Další oblasti pro využití AL mohou být: Ekonomika, zpracování informací, biologie, plánování, simulační softwary, elektronika a bezpečnost. Různé aplikace AL mají své charakteristické znaky, díky kterým se odlišují od ostatních podobných řešení a díky kterým si získaly popularitu. Společnými znaky těchto aplikací jsou:

- 1) Dosažení chování podobnému jako u biologických tvorů.
- 2) Před procesem tvorby nejsou známy výsledné podrobnosti a výsledek často nemusí odpovídat předpovídanému řešení.
- 3) Návrh bez odborných znalostí.
- 4) Interdisciplinární spolupráce.
- 5) Vysoké výpočetní nároky.
- 6) Postupná evoluce jednoduchých primitiv.
- 7) Počítačové simulace, na kterých se daná aplikace testuje. [6, 9]

Největší oblastí, ve které se využívá AL, ovšem zůstává výzkum. V dnešní době se AL využívá nejvíce pro výzkum v těchto oblastech: Původ života, autonomie, sebeorganizace, adaptace, ekologie, umělé společnosti, chování, výpočetní biologie, umělá chemie, informace, živé technologie, umění a filozofie. [9]

## 2.4 Otevřené problémy umělého života

I když na poli umělého života bylo v posledních letech provedeno mnoho význačných objevů v různých vědních oborech, stále tu je mnoho k objevení. S neustále se vylepšující technikou a přístupem k pokročilým technologiím, neustále přibývají otázky, na které by nám mohlo studium umělého života odpovědět. Americký filozof Mark A. Bedau v roce 2000 vytvořil seznam 14 otevřených problémů AL:

- 1) Generovat molekulární proto-organismus *in vitro*.
- 2) Dosáhnout přechodu do života v umělé chemii *in silico*.
- 3) Určit, zda mohou existovat nové základní živé organizace.
- 4) Simulovat celý životní cyklus jednobuněčného organismu.
- 5) Vysvětlit, jak jsou pravidla a symboly generovány z fyzikálních dynamik v živých systémech.
- 6) Určit, co je nevyhnutelné u evoluce života s otevřeným koncem.
- 7) Určit minimální podmínky pro evoluční přechod ze specifické do generické odezvy systému.
- 8) Vytvořit formální rozhraní pro syntézu dynamických hierarchií pro všechna měřítká.
- 9) Určit předvídatelnost evolučních důsledků manipulace s organismy a ekosystémy.
- 10) Vytvořit teorii o zpracování informací, informačním toku a generování informací pro vyvíjející se systémy.
- 11) Demonstrovat vznik inteligence a mysli v umělých živých systémech.
- 12) Vyhodnotit vliv strojů na další významnou evoluční změnu života.
- 13) Poskytnout kvantitativní model souhry mezi kulturní a biologickou evolucí.
- 14) Stanovit etické zásady pro umělý život. [2, 3]

U většiny těchto problémů byl během let učiněn pokrok, ale všechny tyto problémy zůstávají otevřené a stále slouží jako vodítka a možné cíle pro budoucí studium umělého života. Budoucí studium umělého života má velký potenciál pro téměř všechny vědní obory a dokonce i pro lepší život všech lidí. I když jsme v tuto chvíli stále daleko od vytvoření velice komplexního umělého života a stále narážíme na limitace a překážky při jeho tvoření, tak s tím, jak rychlým tempem pokračuje výzkum umělého života, by mohl být v blízké budoucnosti vytvořen život, který už nebude tak „umělý“. [2, 3]



## 3 SOFTWAREVÉ MODELY

Aby bylo možné představit jednotlivé softwarové modely, je nejprve nutné definovat co je to *celulární automat* (dále jen CA – *cellular automata*). Celulární automat je dynamický systém, diskrétní v hodnotách, prostoru i čase. Je tvořen pravidelnou strukturou buněk v  $N$ -rozměrném prostoru, nejčastěji ve 2D, kde buňky tvoří čtvercovou mřížku. Každá buňka může nabývat jeden z  $K$  možných stavů. Často se jedná pouze o dva stavy: 0 - mrtvá buňka a 1 - živá buňka, v tomto případě se občas stav 1 označuje jako buňka a 0 jako prázdné pole. Hodnoty stavů buněk v dalším časovém okamžiku se vypočítávají synchronně na základě lokální přechodové funkce stejné pro všechny buňky. Argumenty této funkce jsou aktuální hodnoty stavů vyšetřované buňky a všech sousedů. [4, 6, 8]

Pro CA jsou tedy charakteristické tři klíčové vlastnosti:

- paralelismus: výpočet nových hodnot stavů všech prvků probíhá současně,
- lokalita: nový stav prvku závisí jen na jeho původním stavu a na původních stavech prvků z jeho okolí,
- homogenita: pro všechny prvky platí stejná lokální přechodová funkce. [4]

### 3.1 Von Neumannův CA

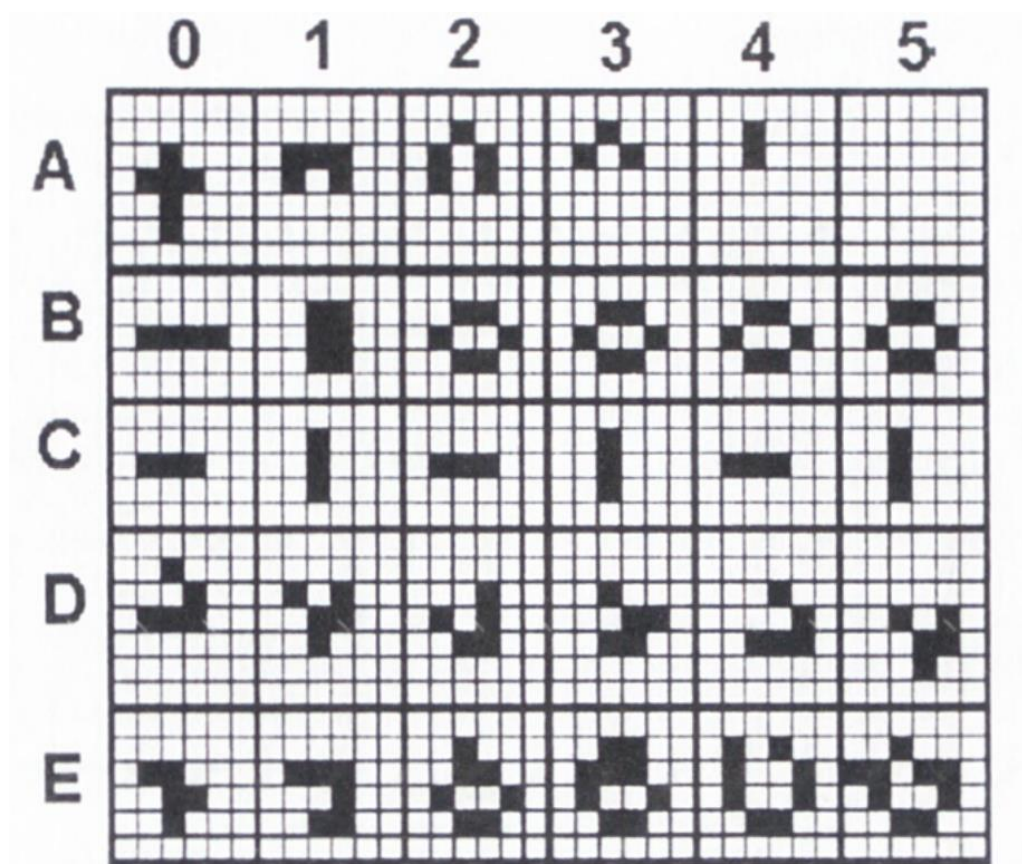
Matematik John Von Neumann nebyl spokojen s konceptem kinematického modelu, a tak za pomoci svého přítele a spolupracovníka Stanislaw Ulama přetvořil kinematický model na první celulární automat. Inspirováni růstem krystalů navrhli prostředí tvořené pravidelnou mřížkou, kde každé políčko představovalo jednu buňku. Každá buňka představuje konečný automat, pracující se shodnou množinou pravidel. Množinu takovýchto buněk pak lze považovat za organismus. [4, 8]

### 3.2 Hra života

Hra života (GoL – *Game of Life*) je v současnosti nejpopulárnějším CA. John Horton Conway, britský matematik na University of Cambridge, se snažil sestavit neumannovský 2D CA v mnohem jednodušší podobě. Pracoval pouze se dvěma stavy: buňkou a prázdným políčkem. Dlouho experimentoval s vhodnou lokální přechodovou funkcí, pravidly pro zrod, přežití a uhynutí buňky. Nakonec našel pravidla, která zaručovala nejpestřejší dynamiku obrazců tvořených populacemi buněk:

- zrod: v okolí prázdného políčka jsou právě tři buňky,
- přežití: v okolí buňky jsou dvě nebo tři další buňky,
- uhynutí: v okolí buňky je 0, 1, 4, 5, 6, 7 nebo 8 dalších buněk. [4, 8]

Výsledná pravidla poskytují též přijatelnou biologickou interpretaci, např. uhynutí osamocené buňky, ale též buňky v přehuštěné populaci; pokud mají buňky přijatelné podmínky, přežívají a mohou vytvořit nové buňky. Po několika generacích začnou populace buněk tvořit jednoduché struktury, které můžeme vidět na obr. 2.



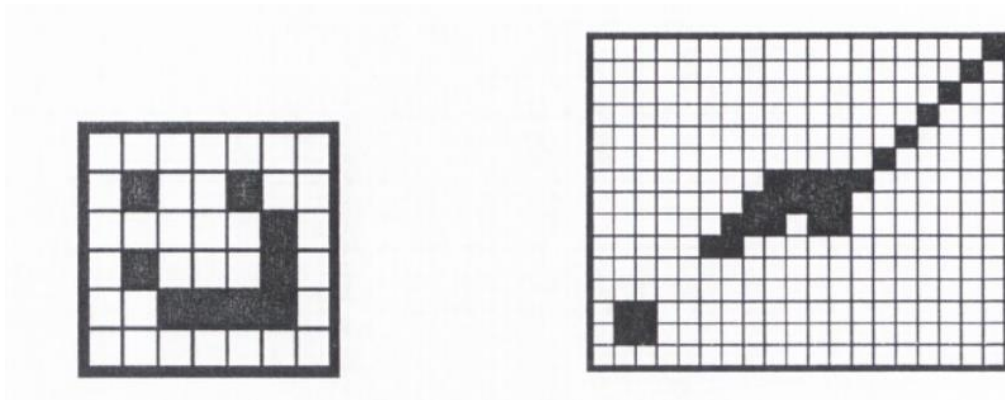
Obr. 2 Jednoduché struktury v GoL [4]

Jednotlivé struktury na obr. 2 jsou:

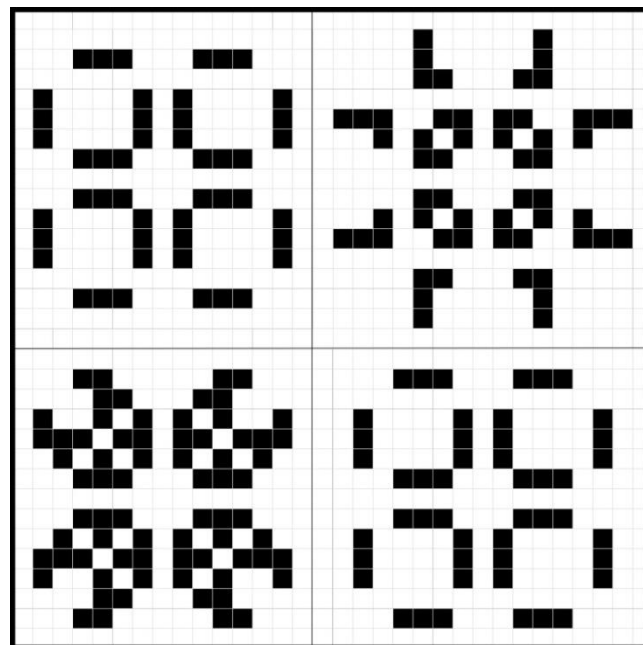
- zanikající obrazce (řádek A),
- stabilní obrazce (řádek B),
- cyklicky se opakující obrazec: takzvaný blikáč, který „bliká“ mezi dvěma stavy (řádek C),
- cyklicky se opakující, ale posunutý obrazec: takzvaný kluzák, který je v dalších generacích ve stejném tvaru posunut o jedno políčko po úhlopříčce (řádek D),
- R-pentomino: obrazce, jejichž stabilizace zabere velký počet cyklů (řádek E). [4]

V prostředí Conwayova CA mohou vznikat i složitější struktury, například loď (obr. 3), která se posouvá doprava a kombajn (obr. 3), který se posouvá po nekonečné řadě buněk a nechává za sebou stabilní čtveřice buněk jako „snopy“. Vzniknout mohou i složitější cyklicky se opakující obrazce, mezi které patří například pulzar (obr. 4). William Gosper vytvořil v prostředí Conwayova CA kluzákové dělo, které neustále po určitých cyklech produkuje kluzáky (obr. 5).

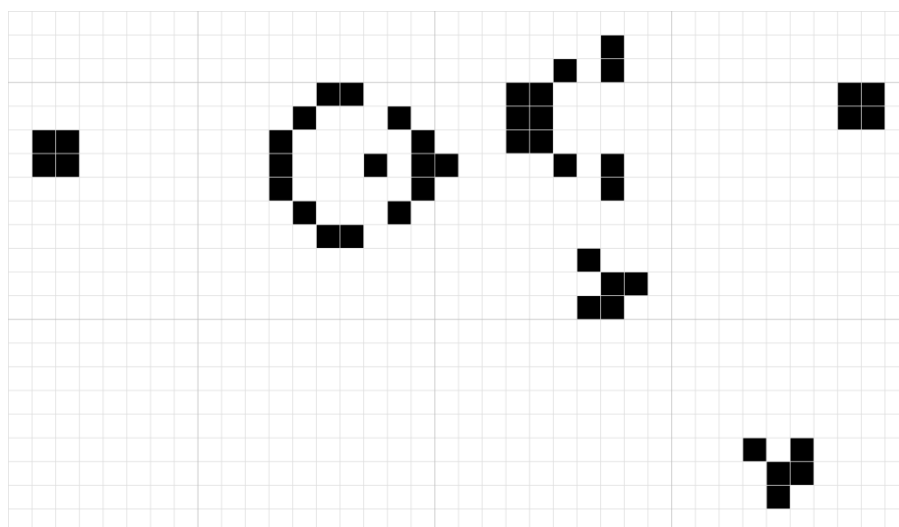




Obr. 3 Loď (vlevo); Korbajn (vpravo) [4]



Obr. 4 Jednotlivé fáze pulzaru



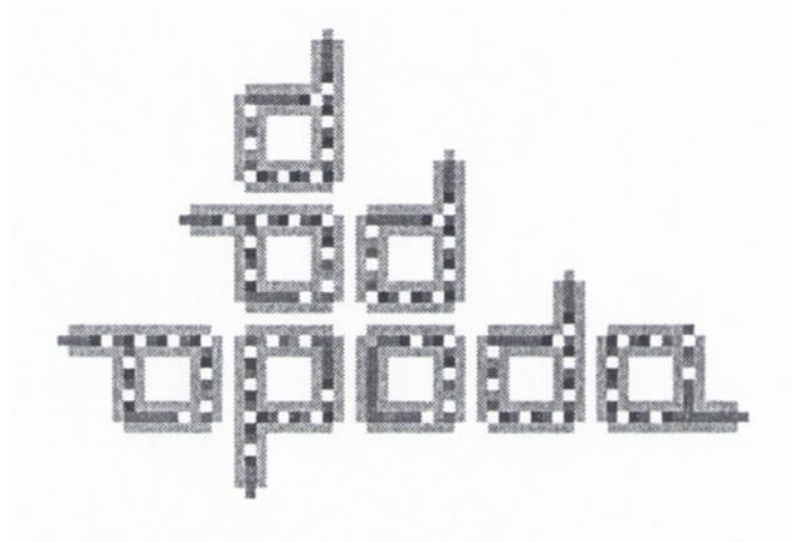
Obr. 5 Kluzákové dělo

### 3.3 Langtonovy Q-smyčky

Christopher Langton sestrojil jednoduchou verzi samo-reprodukcujícího se 2D CA, nazvanou Q-smyčky. Smyčky obsahují genetickou informaci, která neustále koluje smyčkou a „ramenem“, které vzniká zdvojením informace v rozvětvení. Genetická informace udává, že rameno poroste a po určitém počtu kroků se stočí doleva. Tuto operaci provede celkem třikrát, a tím vytvoří dceřinou smyčku, která se nakonec odpojí od smyčky mateřské. Obě smyčky začnou vytvářet kolem sebe další smyčky dle stejných pravidel, až do chvíle kdy smyčka nemá prostor pro vytvoření ramena v příslušném směru, tím dochází k destrukci kolující informace a takzvanému „odumření“ smyčky. Na obrázku 6 je vidět odumírání prostřední smyčky ve spodní řadě. Postupné odumírání smyček nemajících dostatek prostoru pokračuje dál a dochází ke vzniku kolonie aktivních smyček obklopujících neustále se zvětšující „mrtvé“ jádro. [4, 5]

Langtonovy smyčky nám názorně ilustrují dvojí funkci informace, když:

- neinterpretovaná informace se kopíruje do potomka,
- interpretovaná informace charakterizuje tvar a chování jedince, tedy řídí tvorbu potomka. [4]



Obr. 6 Langtonovy Q-smyčky [4]

Na Langtona navázali další výzkumníci a vytvořili různé modifikace sebe-reprodukcující se smyček. Byl a Chou-Reggia redukovali velikost smyček. Tempesti přidal konstrukční schopnost smyčky replikovat obrazce obsažené ve smyčce. Perrier modifikoval smyčky, aby byly schopné vypočítat cokoli vypočitatelného. SDSR smyčky (*Structurally Dissolvable Self-Reproducing Loop*) jsou smyčky, které byly modifikovány, aby se vždy na konci svého životního cyklu rozpadly, což umožňuje neustálý růst a předávání generací. Evoloop je modifikací SDSR smyček, kdy smyčky mohou interagovat se svými sousedy a jsou schopny evoluce. Největším evolučním tlakem na kolonii je v tomto případě nedostatek prostoru, proto se nejvíce daří nejmenším přítomným smyčkám. Sexyloop je poté modifikací Evoloop, kde smyčky mohou mít „sex“. Díky tomu jsou smyčky schopny si navzájem předávat genetické informace. Toto zvyšuje množství diverzity v evoluci nových druhů smyček. [4, 5]

### 3.4 Langtonův mravenec

Langtonův mravenec je jednoduchý 2D CA, který vytvořil Christopher Langton, s velmi jednoduchou sadou pravidel, avšak komplexním chováním. CA je tvořen čtvercovou sítí s bílými a černými buňkami a jednou buňkou, která se označuje jako „mravenec“. Mravenec se může v každém kroku pohybovat čtyřmi směry, podle jednoduchých pravidel:

- bílá buňka: mravenec se otočí o  $90^\circ$  ve směru hodinových ručiček, změní barvu pole a postoupí o jedno pole vpřed,
- černá buňka: mravenec se otočí o  $90^\circ$  proti směru hodinových ručiček, změní barvu pole a postoupí o jedno pole vpřed. [5]

Tato jednoduchá sada pravidel však vede ke komplexnímu chování. Pokud začínáme s čistě bílou mřížkou, pak můžeme pozorovat tři postupné fáze vývoje chování:

- jednoduchost: během prvních pár sta kroků mravenec tvoří jednoduché symetrické vzory,
- chaos: po fázi jednoduchosti nastává chaos, kdy mravenec tvoří velké nepravidelné struktury až do přibližně 10 000 kroků,
- naléhavá objednávka: poslední fáze, ve které se mravenec pustí do stavby „dálnice“, což je struktura, která se opakuje do nekonečna. [5]



Obr. 7 Langtonův mravenec stavící dálnici

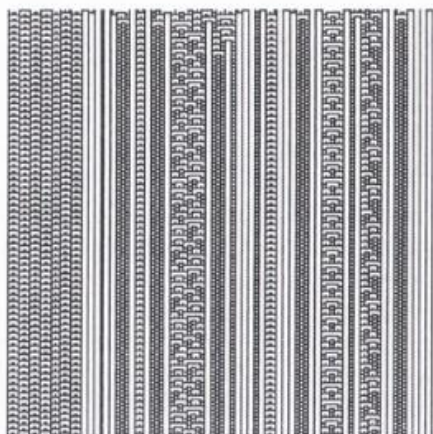
Langtonův mravenec může být jednoduše rozšířen i o další barvy, která mají pravidla obdobná jako původní barvy. Některá tato rozšíření Langtonova mravence jsou schopna produkovat symetrické obrazce do nekonečna. Dalším rozšířením je přidání více stavů samotnému mravenci, jehož barva se tak může měnit. Takovýto mravenec se nazývá „turmit“ a jeho chování se projevuje stavbou dálnic, chaotickým a spirálovým růstem obrazce. Poslední možností rozšíření je přidání více mravenců nebo turmitů do jedné plochy. [5]

### 3.5 Wolframův jednorozměrný CA

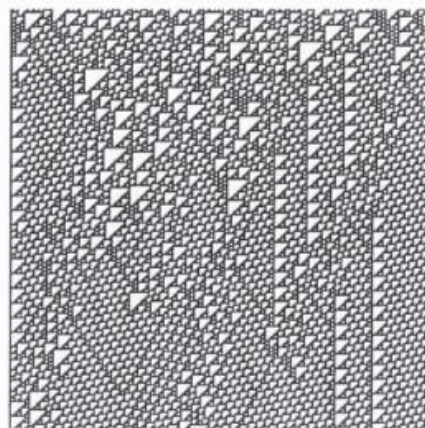
Stephen Wolfram, britský fyzik a matematik, studoval vlastnosti jednorozměrných CA. Jejich výhodou byl poměrně malý počet možných pravidel a názorná reprezentace posloupností generací v řádcích pod sebou. V nejjednodušším případě se jedná o dvoustavový systém, kde okolí sestává ze dvou bezprostředních sousedů. Nová hodnota buňky je určena trojicí starých hodnot. Tato trojice může mít osm podob a této lze přiřadit  $2^8$  výstupních kombinací, tedy výsledný počet možných množin pravidel je 256. Wolfram rozdělil těchto 256 CA do čtyř skupin podle složitosti chování. Tyto skupiny se mohou vyskytovat u všech dalších CA, a to nejen u 1D. Tyto skupiny jsou:

- CA1: všechny buňky nabudou stejné hodnoty 0 (množina 40 na obr. 8) anebo 1,
- CA2: počáteční aktivita se postupně utlumuje a začínají převládat stabilní shluky (množina 228 na obr. 8), nebo poměrně jednoduché cyklicky se opakující struktury (množina 109 na obr. 8),
- CA3: převládá zdánlivě chaotický vývin, není možné pozorovat pravidelnost, obrazce působí jako náhodný šum (množina 22 na obr. 8),
- CA4: vykazují složitou, ale zřejmou pravidelnost, generují se nové obvykle „posuvné“ struktury, struktury „žijí“ poměrně dlouho, tyto CA jsou schopny realizovat univerzální počítač (množina 110 na obr. 8). [4]

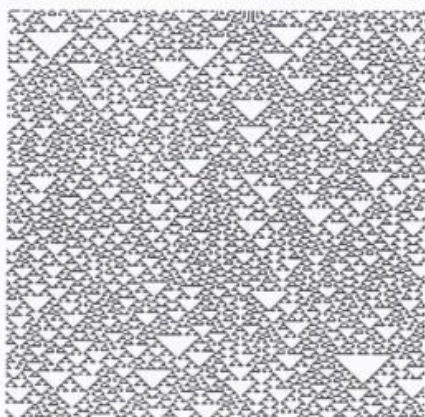
V uvedených příkladech na obrázku 8 proces vždy začíná náhodně generovaným řádkem. Lze vidět, že některé množiny generují zajímavé fraktálové obrazce. Například množina 90 s jedinou jednotkovou buňkou uprostřed řádku generuje Sierpiňského trojúhelník. Wolfram poukázal též na zajímavou skutečnost, že mnohé lastury mají navlas stejnou texturu, jaká vyšla z CA4. [4]



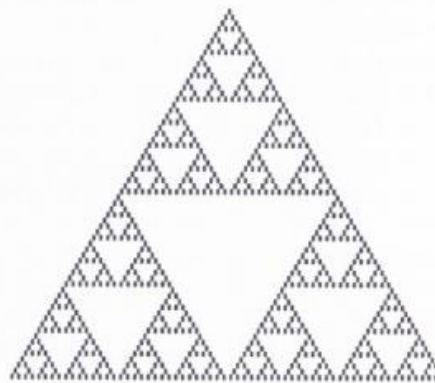
Množina 109 – cyklické struktury.



Množina 110 – na pomezí chaosu.



Množina 22 – chaos.



Množina 90 – fraktálová struktura.



Množina 228 – ustálení na stabilních strukturách.



Množina 109 – detail.



Množina 40 – zánik struktur.

Obr. 8 Příklady Wolframova Celulárního Automatu [4]



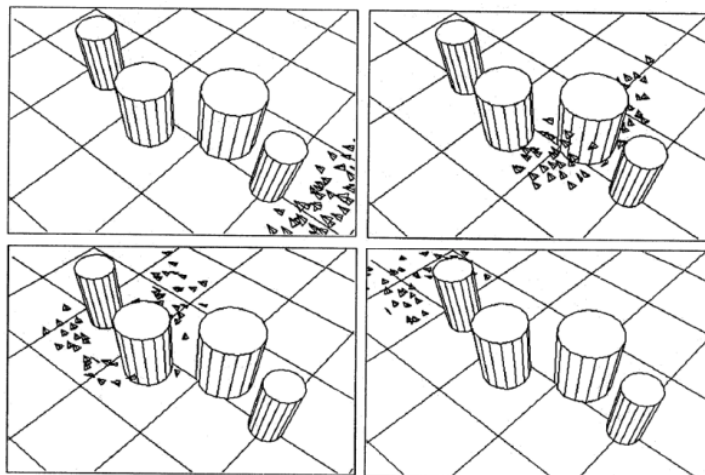
### 3.6 Reynoldsův model shlukování ptáků

Reynoldsův model shlukování ptáků je příkladem širší koncepce CA bez předpokladu pravidelné mřížky. Jde o simulaci chování hejna ptáků, kterou vytvořil animátor Craig Reynolds. Při pozorování hejna ptáků si lze všimnout, jak systematicky se hejno pohybuje ve vzduchu a jak se vyhýbá překážkám, jako kdyby bylo hejno řízeno nějakým centrem. Podrobný výzkum však ukázal, že celý proces je decentralizovaný a každý jedinec se řídí jednoduchými pravidly a využívá pouze lokální informace. Chování hejna pak vzniká ze součinnosti lokálních akcí jedinců. Pravidla pro každého jedince jsou:

- shromažďování: jedinec směřuje k těžišti svých sousedů,
- sladění rychlosti: jedinec přizpůsobuje rychlost svým sousedům,
- vyhýbání se kolizi: jedinec opouští své místo ve chvíli, když se neúměrně přiblíží k některému ze svých sousedů. [4]

Reynolds vytvořil model virtuálních jedinců, které nazval „boidy“ a ti se řídili dle definovaných pravidel. Na počátku simulace boidy chvíli „váhaly“ a posléze se shlukly do hejna. Ať již byla trajektorie naplánována jakkoli, boidy se vždy držely v hejnu. V případě setkání s překážkou se hejno rozdělilo a za překážkou se zase spojilo. Pokud se stalo, že boid do překážky narazil, tak chvíli zůstal „otřesen“, pak se ale vzpamatoval a vyrazil prudce za hejnem, ke kterému se připojil. Toto chování je příkladem toho, jak sofistikované chování může vyplynout i z jednoduchých pravidel. Reynoldsovy simulace byly tak věrné, že ornitologové přijali jeho hypotézu, že chování živého hejna se řídí analogickými pravidly. [4]

Podobně uvažoval i Langton, když navrhl simulaci chování virtuálních mravenců „vantů“. Vanty se pohybovaly po mřížce dle jednoduchých pravidel a nechávaly za sebou „feromonovou“ stopu. Výsledné chování vantů bylo velice podobné chování sociálního hmyzu. Dalším, kdo se zabýval modelováním kolektivního chování sociálního hmyzu, byl Jean-Louis Deneubourg. Deneubourg sestavil na základě pozorování několik jednoduchých pravidel pro chování termita a konstatoval, že skupinové chování bylo velmi blízké chování živého termitiště. Výsledky simulací Langtona i Deneubourga byly ve shodě s poznatky entomologů, že složité chování hmyzu vyplývá z kooperace rovnocenných jedinců bez nutnosti řídicího jedince. [4]



Obr. 9 Boidy vyhýbající se překážce [6]

### 3.7 Lindenmayerovy systémy

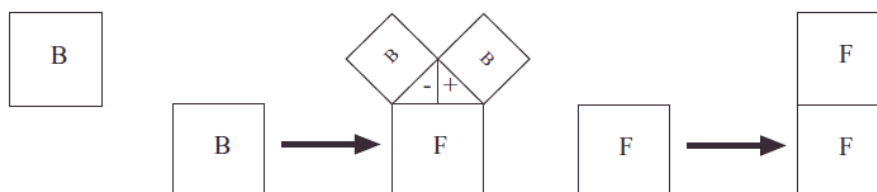
Aristid Lindenmayer, maďarský biolog, vymyslel matematické formulace pro modelování růstu a vývoje jednoduchých mnohobuněčných organismů, většinou rostlin. Tyto formulace jsou známé jako Lindenmayerovy systémy neboli L-systémy. Tyto systémy lze považovat za speciální případ celulárních automatů, vzhledem k tomu, že stav prvku v následujícím kroku je odvozen od aktuálních stavů okolních prvků. L-systém jako celek udává, jaká pravidla jsou aplikována na symboly, aby se co nejvíce starých symbolů nahradilo novými symboly. S L-systémy se můžeme nejčastěji setkat například ve filmech, kde se s jejich pomocí simuluje růst rostlin. [6]

Pro názornost je možné uvést jednoduchý příklad s následujícími pravidly:

**Axiom:** B – počátek s osamocenou buňkou B

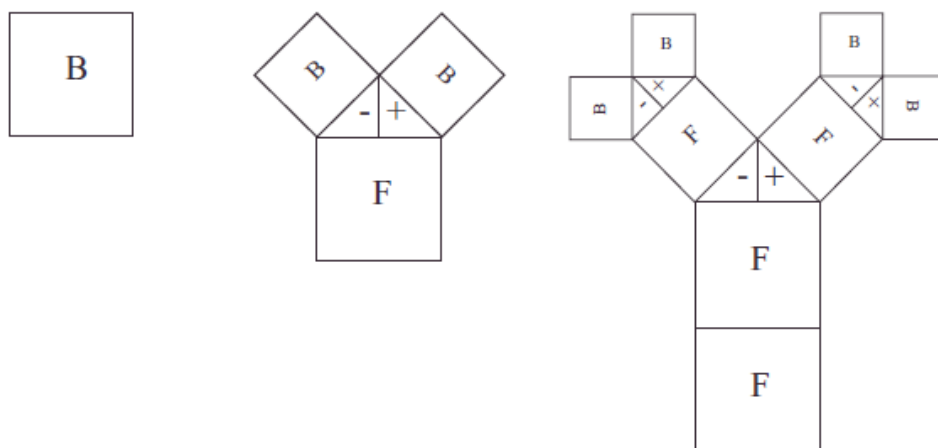
**Pravidlo 1:**  $B \rightarrow F[-B] + B$  – každá buňka B se rozpadne na buňku F a další dvě buňky B, kdy jedna je otočená o daný úhel doprava (+B) a druhá o daný úhel doleva (-B).

**Pravidlo 2:**  $F \rightarrow FF$  – každá buňka F se rozdělí na dvě buňky F



Obr. 10 Grafické vyobrazení pravidel [6]

V našem příkladu začínáme s osamocenou buňkou B, na tuto situaci můžeme aplikovat pouze Pravidlo 1 a dostáváme tak řetězec:  $F[-B] + B$ . Na tento řetězec už můžeme použít jak Pravidlo 1, tak Pravidlo 2. Obě pravidla se aplikují současně a dostáváme řetězec:  $FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B$ . V dalším kroku je pak řetězec:  $FFFF[-FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B] + FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B$ . Jak lze vidět, řetězec dramaticky narůstá a stává se nepřehledným. Takovýto řetězec může růst až do nekonečna. Na obrázku 11 jsou graficky znázorněny první tři kroky pomocí buněk. [6]



Obr. 11 Grafické vyobrazení prvních tří kroků příkladu [6]

### 3.8 Želví grafika

Vlastní L-systémy samy negenerují obrazce, ale jen řetězce znaků. Na obrázku 11 je možné vidět jeden ze způsobů grafické interpretace L-systému, avšak nejběžnějším způsobem vizualizace L-systémů je takzvaná želví grafika, známá z programovacího jazyka LOGO. Jedná se o modifikovanou verzi jednoduchého počítačového jazyka pro děti na kreslení obrázků. Kreslení je prováděno virtuální želvou, která jednotlivé symboly řetězce chápe jako příkazy pro řízení jejího pohybu. Základními příkazy pro řízení želvy jsou [6]:

F	Kresli vpřed (s pevnou délkou posunu)
	Kresli vpřed (s délkou určenou z dané hloubky)
G	Jdi vpřed (s pevnou délkou posuvu)
+	Otoč se doprava o daný úhel
-	Otoč se doleva o daný úhel
[	Ulož současnou pozici a orientaci želvy pro další použití
]	Obnov naposledy uloženou pozici a orientaci želvy

Nyní je možné si ukázat jednoduchý příklad L-systému zobrazeného pomocí želví grafiky. Systém se bude řídit dle pravidel [6]:

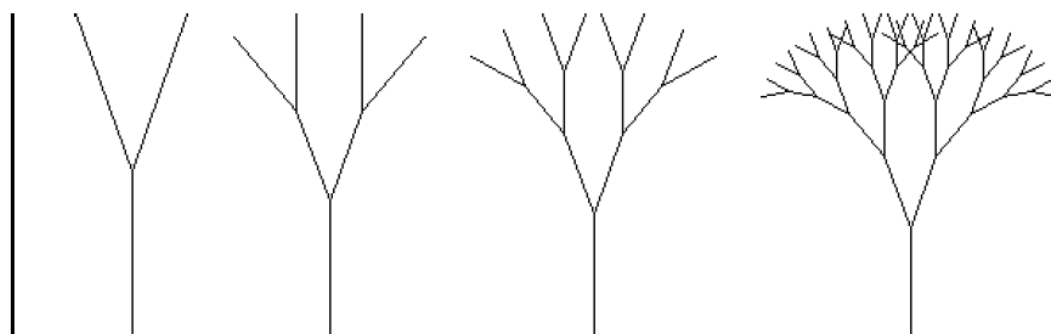
**Axiom:** F

**Pravidlo:**  $F = | [-F] [F]$

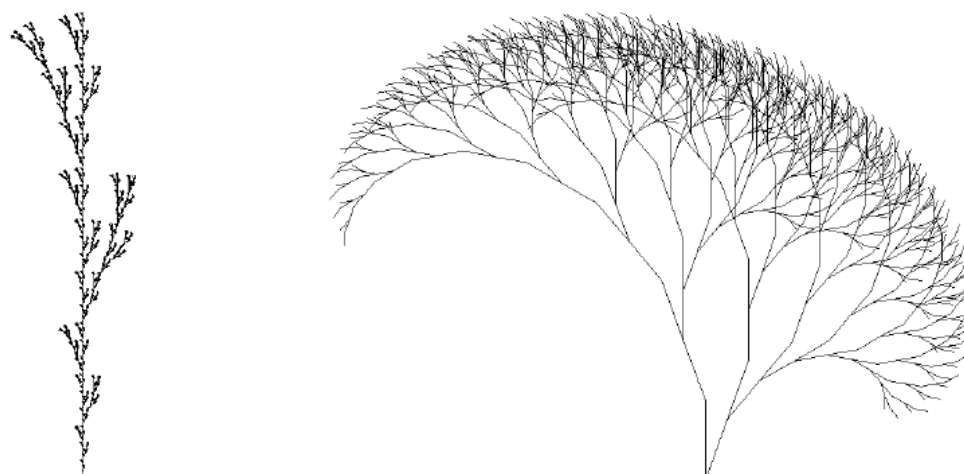
**Úhel:**  $20^\circ$

Kresba začíná jako axiom, tedy čára, po aplikaci pravidla se však začne rozvětňovat a postupně tvořit strukturu, kterou lze vidět na obrázku 12. Na obrázku 13 lze vidět již složitější struktury vytvořené dle pravidel dále uvedených.





Obr. 12 Prvních pět fází L-systému [6]



Obr. 13 Příklady složitějších L-systémů [6]

Pravidla pro struktury složitějších L-systémů zobrazených na obr. 13:

**Axiom:** F

**Pravidlo:**  $F = F [-F] F [+F] F$

**Úhel:**  $20^\circ$

**Hloubka:** 7

**Axiom:** F

**Pravidlo:**  $F = | [+F] | [-F] +F$

**Úhel:**  $20^\circ$

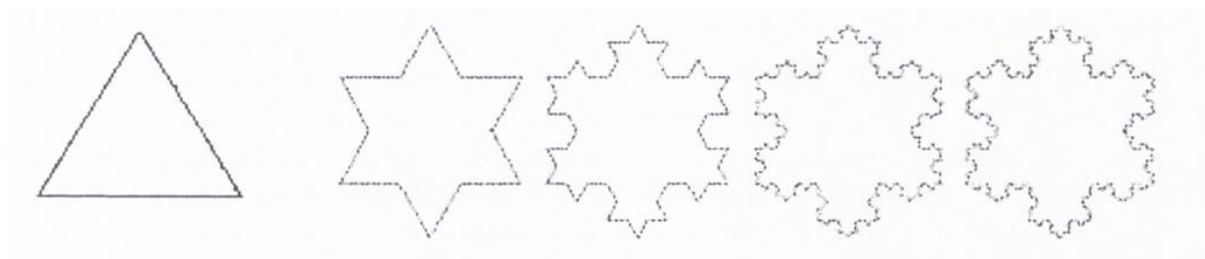
**Hloubka:** 9

### 3.9 Fraktály

Jednoduché L-systémy jsou případy obecné struktury jménem fraktály. Fraktály jsou geometrické obrazce, které mají jednu velkou přednost: jsou sobě-podobné na více úrovních, což znamená, že malá část fraktálu vypadá stejně jako celý fraktál. Fraktál má na pohled velice složitý tvar, je však generován jednoduchými pravidly. [4, 6]

Fraktály se často vyskytují v přírodě. Nejčastěji se s nimi můžeme setkat u rostlin (např. kapradiny), sněhových vloček, nebo u cév. Fraktály jsou v přírodě odpovědí na problém s optimalizací systému, který má konfliktní cíle. Kupříkladu systém cév má zásobit každou část těla krví za použití co nejmenšího množství a zároveň za co nejkratší možný čas oběhu. Samozřejmě přírodní fraktály nejsou perfektní matematické fraktály, protože nemají nekonečně jemné struktury. [4, 6]

Při vytváření fraktálů se obecně používají čtyři typy transformací: translace, škálování, reflexe a rotace. Algoritmy pro jejich generování jsou vždy rekurzivní a jsou založeny na sobě-podobnosti při použití kombinací zmíněných čtyř transformací. Mezi nejznámější fraktály patří vločka Kochové, která byla navržena Helgou Kochovou, první čtyři iterace můžeme vidět na obrázku 14. Dalším známým fraktálovým útvarem je Sierpiňského trojúhelník, který vzniká odstraněním středního trojúhelníku s vrcholy ve středech hran původního trojúhelníku. V dalších iteracích se analogicky odstraňují středy zbývajících trojúhelníků. Sierpiňského trojúhelník je vyobrazen pomocí 1D CA na obrázku 8, množina 90. [4, 6]



Obr. 14 Vločka Kochové - axiom a čtyři iterace [4]

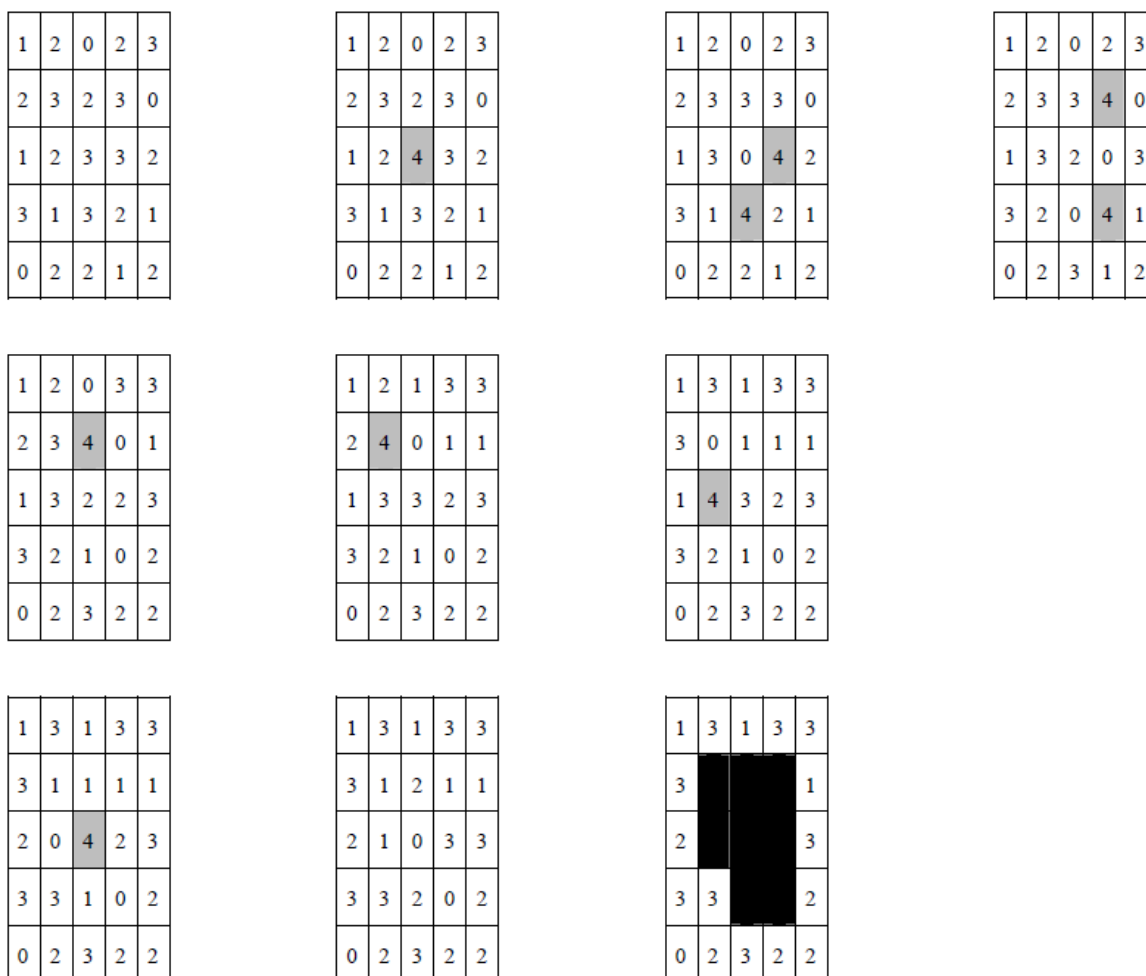
### 3.10 Hromady písku

Koncepce „sebe-organizující se kritičnosti“ (SOC – *self-organized criticality*) je matematická teorie, která popisuje, jak systémy dosahují dynamického chování. Pomocí SOC můžeme vysvětlit některé komplexní vzory, které můžeme nalézt v přírodě. Nejlepším a nejjednodušším příkladem SOC je model hromad písku. [6]

Představme si rovnou plochu, na kterou jsou náhodně sypány zrna písku. Ze začátku zrna písku zůstanou na místě dopadu. S narůstajícím množstvím písku se postupně začnou vytvářet hromady, které se budou zvětšovat a stanou se nestabilními. Začnou se objevovat laviny, které zpočátku mají jen lokální efekty, ale s narůstajícím

množstvím písku se může objevit lavina, která může ovlivnit ostatní hromady písku, nebo dokonce opustit pozorovanou plochu. Nakonec dojde k tomu, že množství přidávaných zrn písku se bude rovnat množství zrn, která opustí plochu. Přidávání zrn písku transformovalo systém ze stavu, ve kterém jednotlivá zrna měla vlastní pravidla na systém, kde vzniklé dynamiky jsou globální. Jednotlivé prvky, které se řídí svými jednoduchými pravidly, vedly prostřednictvím interakce k jedinečné, jemně vyvážené globální situaci, ve které by pohyb kteréhokoli prvku mohl ovlivnit jakýkoli jiný prvek v systému. [6]

K simulaci hromad písku můžeme použít celulární automat kde plochu, na kterou je sypan písek, reprezentujeme dvourozměrnou mřížkou. Každé buňce je přiřazena číselná hodnota, která udává počet zrn, které se nacházejí v daném čtverci. Čtverec, kde se objeví nové zrno písku, je náhodný a počet zrn se v něm vždy navýší o 1. Tento postup se stále opakuje. Pokud se ale počet zrn ve čtverci rovná 4, pak dojde k sesuvu a sousedním čtvercům se navýší počet zrn o 1. Pokud je nestabilní oblast blízko hranice plochy, zrna písku opustí plochu. Na obrázku 15 je možné vidět popsanou simulaci, kde černá pole ukazují, kde všude došlo k sesuvu písku. [6]



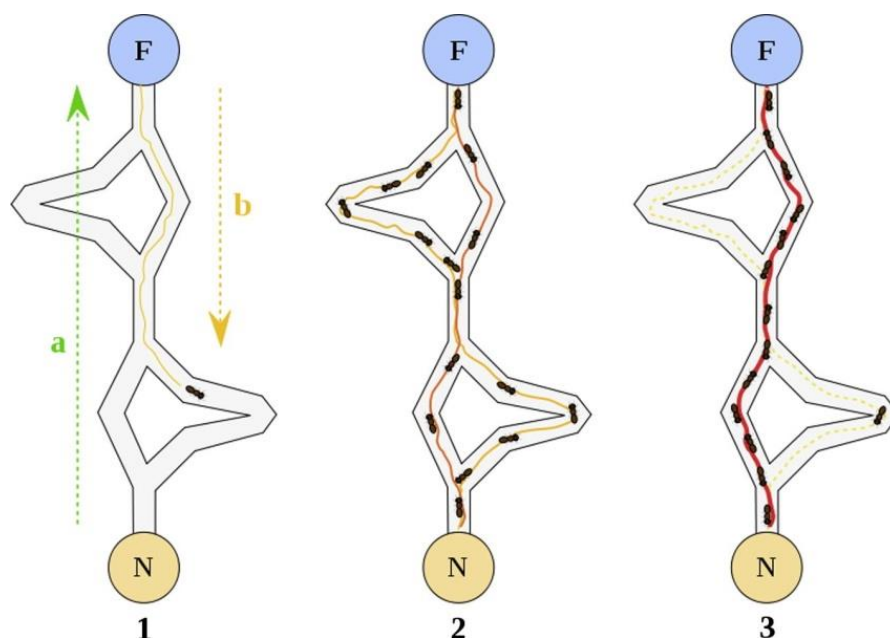
Obr. 15 Ilustrace simulace hromad písku [6]

### 3.11 Chování mravenců

Jak již bylo zmíněno, chování sociálního hmyzu nevychází z centralizovaného vedení a zásahů řídicích jedinců, ale z kooperace rovnocenných jedinců. Toto paralelní aplikování stejných pravidel na každého jedince umožňuje řešit komplexní problémy velmi efektivně a flexibilně. Díky této spolupráci vzniká super-organismus, který je schopen řešit i ty nejsložitější problémy, a to bez jakéhokoliv centralizovaného vedení. [6]

Chování mravenců je jedním z nejlepších příkladů rojové inteligence. Dobrým příkladem je hledání potravy. Z pozorování mraveniště je možné vidět, že mravenci dávají přednost nejbližšímu zdroji potravy a vždy si k němu najdou co možná nejkratší cestu. To je možné díky tomu, že každý mravenec za sebou nechává feromonovou stopu. Mravenci, hledající potravu, opustí mraveniště různými směry a hledají vhodný zdroj potravy. Pokud ho naleznou, vrátí se po své stopě zpět do mraveniště, čímž svou feromonovou stopu zesílí. Pokud mravenec dorazí jako první, pak jeho feromonová stopa je nejsilnější, což znamená, že jeho zdroj potravy je nejbliž a on k němu zvolil efektivní trasu. Pokud ho ale jiný mravenec předstihl, pak jeho stopu už využili jiní mravenci a ta se tak stala dominantní stopou. Stopa může samozřejmě vést ke stejnému zdroji potravy, ale protože druhý mravenec dorazil dříve, znamená to, že jeho trasa je více efektivní. Tímto jsou mravenci schopni optimalizovat sběr potravy, aby byl co nejefektivnější, bez jakéhokoliv centrálního řízení a jen s jednoduchými pravidly.

Na obrázku 16 je možné vidět, jak mravenci postupně našli nejkratší cestu od mraveniště (N) ke zdroji potravy (F).



Obr. 16 Optimalizace sběru potravy

Zdroj obrázku: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515005840>>

### 3.12 Umělá evoluce

Umělá evoluce je jedním z klasických oborů umělého života. Vědci se o ni zajímají zejména proto, že díky ní mohou lépe pochopit principy biologické evoluce, ale mohou také umělou evoluci využít jako nástroj pro optimalizaci. Díky umělé evoluci se doba hledání optimálního řešení problému výrazně zkrátí a bylo již dokázáno, že optimálním řešením problému není vždy takové, které by se lidem na první pohled zdálo. Lidé jsou také při hledání řešení často ovlivňováni svými subjektivními názory na danou problematiku a díky tomu se mohou mýlit, zatímco počítač se řídí jen podle naprogramovaných parametrů, a proto jsou jeho výsledky objektivní. [4, 6]

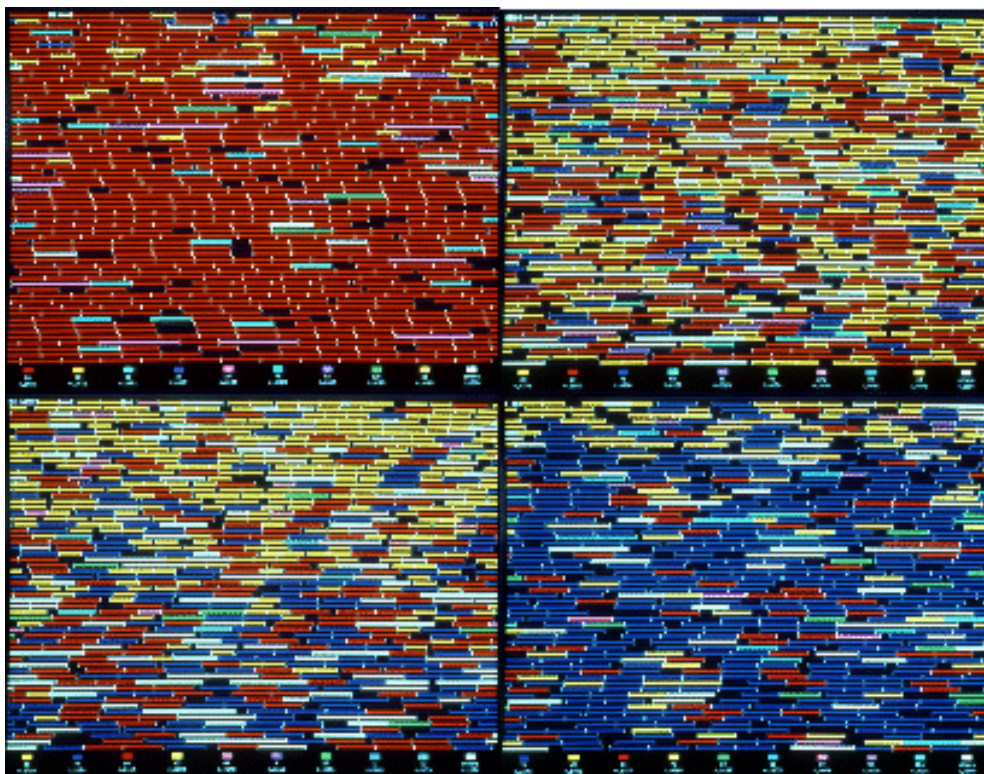
Jedním z příkladů umělé evoluce v počítači je evoluce pomocí parazitů. Proces evoluce má často za následek uvíznutí v lokálním extrému a „organismy“ tak nemohou využít svůj plný evoluční potenciál. Daniel Hillis vytvořil parazity, kteří svou činností narušovali snahy ostatních organismů. Rychlost evolučního zdokonalování díky tomu prudce vzrostla a paraziti navíc vypudili organismy z nižších lokálních extrémů. [4]

Významnou roli pro výzkum umělého života a evoluce hraje *Tierra*. Jedná se o simulaci evoluce s otevřeným koncem, kterou vytvořil biolog Thomas Ray. Ray vytvořil systém sebe-replikujících se počítačových programů, které „žily“ v prostoru virtuálního počítače. Tyto organismy spolu „soutěžily“ o přístup k omezeným zdrojům CPU a paměti, které reprezentovaly „energii“ a „životní prostor“. Programy byly navrženy tak, aby byl umožněn nepatrný výskyt chyb, tedy mutací. Po čase se prostor virtuálního počítače začne plnit replikujícími se organismy, které se od sebe díky mutacím nepatrně odlišují, i když proces začal pouze s jedním „mateřským“ organismem. Jakmile je prostor z velké části zaplněn, organismy začnou soutěžit o prostor a CPU. Ray do své simulace zavedl program, jehož úkolem bylo „zabít“ některé organismy, což mělo simulovat přírodní katastrofy. Díky tomuto bylo dosaženo procesu, který byl analogický k přírodní selekci. Organismy, které byly schopné se replikovat rychleji, byly ve výhodě, jelikož vytvořily více potomků. Díky evoluci se kód těchto organismů zdokonaloval a zkracoval, aby bylo dosaženo jednodušší a rychlejší replikace. Co se ovšem stalo dále, Raye velmi šokovalo. Kód některých organismů se zkrátit natolik, že již nebyly schopny replikace, ale přesto se jim dařilo stejně jako jiným „větším“ organismům. Ukázalo se, že tyto organismy se staly parazity a množily se díky hostitelům. V této části simulace se dalo pozorovat, jak přemnožení parazitů způsobilo snížení počtu hostitelů a následné hynutí parazitů, dokud se počet hostitelů opět nestabilizoval. Poté se ale začaly objevovat organismy, které si vůči parazitům vyvinuly imunitu. Parazité ovšem nezůstali pozadu a rozšířili si svůj kód, aby obešli opatření těchto organismů, a tak začaly nekonečné evoluční závody ve zbrojení. [2, 4, 6, 7]

Na obrázku 17 jsou vidět čtyři hlavní fáze vývoje *Tierra*, které byly pořízeny pomocí *Artificial Life Monitor*. V první části obrázku jsou vidět červeně hostitelé a žlutí parazité se začínají zřídka objevovat. V druhé části obrázku je málo hostitelů, kvůli „přemnožení“ parazitů. Imunní modří hostitelé se začínají zřídka objevovat. V třetí části



obrázku se imunní hostitelé množí a vytlačují parazity do „horní“ části paměti. Ve čtvrté části obrázku je paměť zaplněna imunními hostiteli, zatímco parazité a „citliví“ hostitelé jsou na pokraji vymření.



Obr. 17 Příklady jednotlivých fází Tierra

Zdroj obrázku: <[https://web.mat.upc.edu/francesc.comellas/old-files/buran/Tierra\\_Photoessay.html](https://web.mat.upc.edu/francesc.comellas/old-files/buran/Tierra_Photoessay.html)>

### 3.13 Počítačové viry

Jedním z nejčastějších příkladů umělého života, o kterém každý uživatel počítače alespoň slyšel, je počítačový virus. Fred Cohen poprvé definoval počítačový virus jako program, který „nakazí“ jiný program, modifikuje ho vložením své kopie, popř. její mutace. První programy modelující dravce schopné samo-replikace byly vytvořeny v roce 1962 ve hře *Darwin*. Avšak tyto „organismy“ strávily většinu času hledáním partnera a nedostávalo se jim sil na boj s nepřítelem. Tvorbu virů plně odstartovala hra *Core War*, kde byly organismy reprezentovány v jazyce *Redcode*, což zabraňovalo jejich šíření v obyčejném počítačovém prostředí. V listopadu 1988 R. Morris pustil do sítě samo-replikující se program, který dostal jméno *Internet Worm*. Nad tímto programem ztratil kontrolu a jen přihlížel, jak se nekontrolovatelně šíří po síti. Na první Alife konferenci bylo konstatováno, že počítačové viry nejlépe splňují požadavky kladené na entitu, považovanou za živou. Úloha virů ještě nebyla zcela prozkoumána, ale existují názory, že viry zabraňují uvíznutí evolučního procesu v lokálním extrému, čehož se využívá v některých simulacích umělé evoluce. [4]

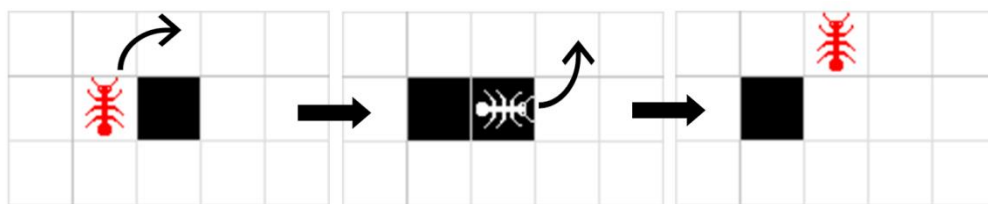
## 4 IMPLEMENTACE JEDNODUCHÉHO MODELU

V této kapitole je popsána praktická implementace jednoduchého celulárního automatu a provedení experimentů. Pro simulace byl zvolen model Langtonova mravence.

### 4.1 Langtonův mravenec

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.4, Langtonův mravenec je 2D celulární automat s jednoduchými pravidly. CA je tvořen čtvercovou sítí s bílými a černými buňkami a jednou buňkou, která se označuje jako „mravenec“. Mravenec se může v každém kroku pohybovat čtyřmi směry, podle jednoduchých pravidel:

- bílá buňka – mravenec se otočí o  $90^\circ$  ve směru hodinových ručiček, změní barvu pole a postoupí o jedno pole vpřed,
- černá buňka – mravenec se otočí o  $90^\circ$  proti směru hodinových ručiček, změní barvu pole a postoupí o jedno pole vpřed.



Obr. 18 Pravidla pro pohyb mravence

Pravidla pro pohyb mravence se označují dle jednoduchého schématu. Pokud existuje barva, na které se mravenec otočí po směru hodinových ručiček, pak se tento stav označí písmenem R a pokud existuje barva, na které se mravenec otočí proti směru hodinových ručiček, pak se tento stav označí písmenem L. Základní pravidla pro Langtonova mravence se tak označují jako „RL“. Mimo tyto dva základní stavy se také můžeme setkat s písmenem N, které označuje zachování orientace mravence a U, které označuje otočení mravence o  $180^\circ$ . Pokud se nahradí čtvercová síť hexagonální, pak se k písmenům R a L přidávají čísla (1, 2), které označují, o kolik stupňů se mravenec v daném směru otočí.

Jednotlivé experimenty na tomto CA budou provedeny za použití následných modifikací:

- náhodné přidání černých buněk do bílé mřížky,
- přidání druhého mravence do jednoho prostoru,
- rozšíření o třetí barvu (RLR),
- rozšíření o čtvrtou barvu (RLRL, LLRR),
- implementace složitějších pravidel: RRLLLRLLRRR a  
RLRRLLLLRRR.

## 4.2 Programové prostředí

Pro implementaci modelu a provedení experimentů byla zvolena aplikace Golly. Golly je open source aplikace fungující na všech platformách. Aplikace slouží ke zkoumání různých typů celulárních automatů, mezi které patří zejména Conwayova hra života, která je blíže popsána v kapitole 3.2. Aplikace byla vytvořena Andrewem Trevorrowem a Tomem Rokicki. Pro simulace byla využita verze z října roku 2020 – Golly 4.0 pro platformu Microsoft Windows 10, 64-Bit. Výhodou u této aplikace je, že umožňuje spuštění python skriptů, což umožňuje vytvářet složitější modifikace jednoduchých přednastavených pravidel.



Obr. 19 Prostředí programu Golly



### 4.3 Popis experimentů

Cílem experimentů je pozorování změn chování mravence. První simulace je provedena při použití klasických pravidel pro Langtonova mravence (popsaných v kapitole 4.1) a bílé čtvercové mřížky. Mravenec v této simulaci začíná ve fázi jednoduchosti, kde tvoří jednoduché symetrické vzory. Přibližně po 500 krocích přechází do fáze chaosu a po 10 000 krocích do fáze nazvané naléhavá objednávka, kdy mravenec začne stavět strukturu nazvanou dálnice. Tato simulace slouží k porovnání změn chování mravence pro následné modifikace pravidel a prostředí. (obr. 20, A)

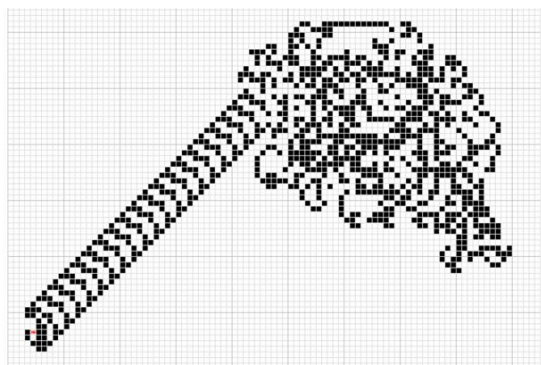
První modifikací je náhodné přidání několika černých buněk do okolí počáteční pozice mravence. Simulace ukázala, že při této modifikaci mravenec „přeskakuje“ rovnou do fáze chaosu a dálnici začíná stavět už při přibližně 5 000 krocích a výsledný obrazec je menší. (obr. 20, B)

Druhou modifikací je přidání druhého mravence do stejného prostoru. Tato simulace ze začátku probíhá stejně jako u klasického Langtonova mravence. Odlišnosti nastávají až tehdy, když mravenci propojí své obrazce. Díky tomuto propojení jeden z mravenců začíná stavět svoji dálnici už po přibližně 3 000 krocích, zatímco stavba druhého mravence je opožděna a mravenec svou dálnici začíná stavět až po 13 000 krocích. (obr. 20, C)

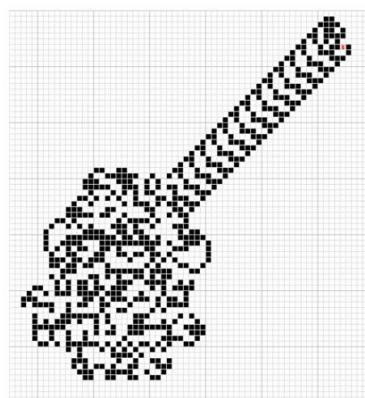
Třetí modifikací je přidání třetí barvy, na které se bude mravenec otáčet ve směru hodinových ručiček a pravidla se tak rozšíří na RLR. Tato simulace je zajímavá tím, že začíná ve fázi chaosu a už v ní zůstane. Mravenec neustále tvoří větší chaotickou strukturu a není známo, jestli tento mravenec může vytvořit dálnici. Na obr. 20, D je vyobrazena struktura po 100 000 krocích.

Ve čtvrté modifikaci je přidána čtvrtá barva. Nejprve je přidána barva, na které se mravenec otočí protisměru hodinových ručiček, tedy řada pravidel RLRL. Avšak tato sada pravidel má chování stejné jako původní Langtonův mravenec (obr. 21, E). Proto byla řada pravidel modifikována a vznikla nová řada LLRR. Díky těmto pravidlům mravenec neustále tvoří symetrickou strukturu nazvanou kardioid. U této struktury taktéž není známo, jestli mravenec někdy postaví dálnici. Na obr. 21, F je zobrazen kardioid po 120 000 krocích.

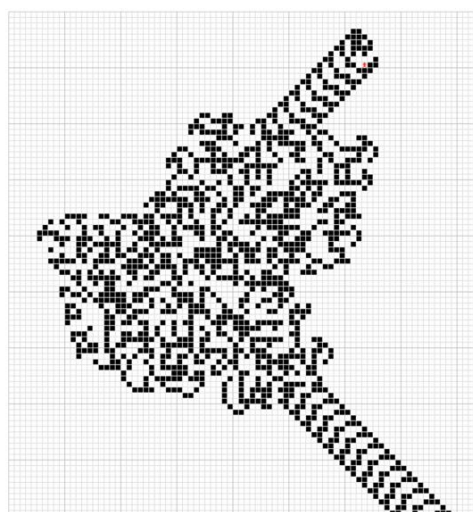
Poslední modifikací je implementace složitějších řad pravidel. Díky řadě pravidel RRLRLRRR mravenec zpočátku vytváří symetrickou strukturu, po uplynutí 15 000 kroků mravenec začne tvořit strukturu, která by se dala přirovnat k dálnici u Langtonova mravence. Tato struktura má však tvar trojúhelníku, který neustále roste, je vyplněný a pomalu se oddaluje od původní struktury. Na obr. 21, G je zobrazena struktura po 50 000 krocích. Při použití inverzní řady pravidel vznikne výsledná struktura zrcadlově obrácená. Při použití řady pravidel RLRRLLLLRRR mravenec zpočátku vytváří symetrickou čtvercovou strukturu. Po uplynutí 500 kroků mravenec začne kolem tohoto jádra tvořit neustále se oddalující čtvercovou hradbovou strukturu, jejíž vnitřní prostor je vyplněn podobně jako u struktury G. Na obr. 21, H je zobrazena struktura po 35 000 krocích.



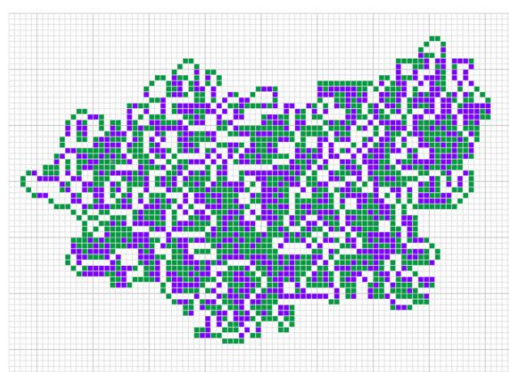
A



B



C

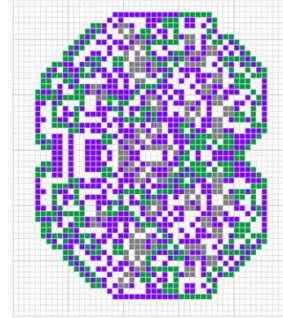


D

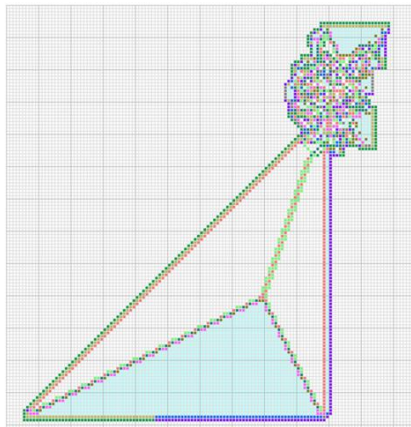
Obr. 20 Výsledné struktury simulací A-D



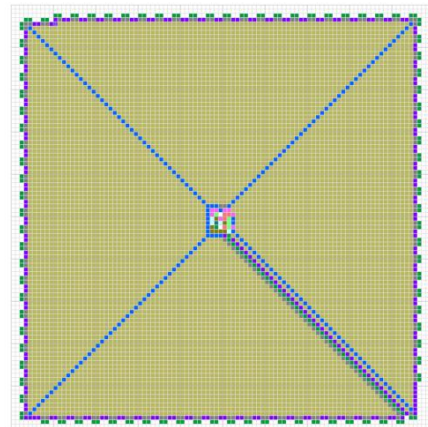
E



F



G



H

Obr. 21 Výsledné struktury simulací E-H



## 5 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na rešerši o umělém životě a vybraných významných softwarových modelech. I přesto, že je obor umělého života, jak ho známe dnes, velmi mladý, přináší velké množství výsledků z různých vědních oborů. Zatímco jiné vědní obory se snaží pronikat do hloubky zkoumané problematiky a postupovat od zkoumání komplexních struktur až k jednotlivým primitivům, umělý život oproti tomu postupuje opačným směrem a pomocí jednoduchých základních pravidel je schopen vytvářet komplexní struktury. Chování těchto struktur lze pozorovat a díky tomu je možné odhalit záhady fungování reálného biologického světa. Toto chování pak lze replikovat a využít v mnoha vědních oborech. Budoucí výzkum umělého života v sobě nese velký potenciál pro vytváření lepšího životního prostředí, zlepšení kvality života lidí a má i velký potenciál pro budoucí „dobývání“ kosmu.

Softwarových modelů, které modelují život nebo jeho jednotlivé pochody, je mnoho. V této práci byly popsány takové modely, které jsou důležité pro výzkum umělého života nebo významné z historického hlediska. Softwarové modely AL mohou být realizovány různými způsoby, nejčastějšími jsou však realizace pomocí celulárních automatů, které se nejlépe hodí pro simulace buněčných pochodů nebo struktur chování, které se dají realizovat pomocí buněk. Druhou významnou realizací jsou L-systémy, které simulují vývoj složitějších mnohobuněčných organismů a často se využívají pro simulování růstu rostlin. Cílem druhé kapitoly tak bylo seznámit čtenáře s celulárními automaty, L-systémy a jednotlivými modely takovým způsobem, aby byla pochopena základní podstata každého modelu i bez významných znalostí v oboru.

V poslední kapitole byly provedeny experimenty na jednoduchém celulárním automatu. Vybraným celulárním automatem byl Langtonův mravenec a simulace byly provedeny v programu Golly. Langtonův mravenec má jednoduchou sadu pravidel a generuje vždy podobné struktury během stejného počtu kroků a s rozeznatelnými změnami chování mravence během simulace. Pokud ovšem tento automat modifikujeme například přidáním více mravenců do jedné plochy, nebo rozšířením pravidel o více barev, pak je mravenec schopen generovat složité struktury, které mohou často růst do nekonečna, a to vše jen díky drobné modifikaci. Tímto je ukázáno, že navenek komplexní a složitá chování v přírodě se vždy nemusí řídit složitými pravidly a většina přírodních procesů si tak vystačí s jednoduchou sadou pravidel.



## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AGUILAR, W. *The Past, Present, and Future of Artificial Life. Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 1, 2014, 8 stran.
- [2] BEDAU, M. A. *Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up. TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol. 7, No. 11, 2003, pp. 505-512.
- [3] BELK, R. *Artificial Life. Journal of Macromarketing*, 2020, Vol. 40, No. 2, 2020, pp. 221-236.
- [4] CSONTÓ, J. *Umělý život*. In: Mařík V. a kol. *Umělá inteligence (3)*. Praha, Academia, 2001. ISBN 978-80-200-2276-9
- [5] LANGTON, Ch. G. *Studying artificial life with cellular automata. Physica D*, 1986: Nonlinear Phenomena 22(1-3): 120-149
- [6] WEBER, M. M., KUNZ, H., THOMAS, D., PFEIFER, R., *Artificial Life* [online]. 2001 [cit.2021-03-27]. Dostupné z: <[http://www.ais.uni-bonn.de/SS09/skript\\_artif\\_life\\_pfeifer\\_unizh.pdf](http://www.ais.uni-bonn.de/SS09/skript_artif_life_pfeifer_unizh.pdf)>.
- [7] RAY, T.. *Documentation for the Tierra Simulator* [online]. 1998 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <<http://life.ou.edu/pubs/doc/index.html>>.
- [8] BERTO, F., TAGLIABUE, J.. *Cellular Automata* [online] 2012 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <<https://plato.stanford.edu/entries/cellular-automata/#pagetopright>>
- [9] OLUDELE, A., OLUWABUNMI O., SHADE, K.. 2015. *An overview of artificial life* [online]. 2015, 6-10 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328067145\\_An\\_overview\\_of\\_artificial\\_life](https://www.researchgate.net/publication/328067145_An_overview_of_artificial_life)
- [10] HELLER, P., MATOUŠEK. V.. *Umělý život* [online]. 2019, 1-77 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <<https://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/predn/P3/FThema3.pdf>>





## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Souhrn historických kořenů umělého života [1].....	19
Obr. 2 Jednoduché struktury v GoL [4] .....	24
Obr. 3 Lod' (vlevo); Korbajn (vpravo) [4] .....	25
Obr. 4 Jednotlivé fáze pulzaru .....	25
Obr. 5 Kluzákové dělo .....	25
Obr. 6 Langtonovy Q-smyčky [4].....	26
Obr. 7 Langtonův mravenec stavící dálnici .....	27
Obr. 8 Příklady Wolframova Celulárního Automatu [4] .....	29
Obr. 9 Boidy vyhýbající se překážce [6].....	30
Obr. 10 Grafické vyobrazení pravidel [6].....	31
Obr. 11 Grafické vyobrazení prvních tří kroků příkladu [6].....	32
Obr. 12 Prvních pět fází L-systému [6].....	33
Obr. 13 Příklady složitějších L-systémů [6] .....	33
Obr. 14 Vločka Kochové - axiom a čtyři iterace [4].....	34
Obr. 15 Ilustrace simulace hromad písku [6].....	35
Obr. 16 Optimalizace sběru potravy .....	36
Obr. 17 Příklady jednotlivých fází Tierra .....	38
Obr. 18 Pravidla pro pohyb mravence .....	39
Obr. 19 Prostředí programu Golly .....	40
Obr. 20 Výsledné struktury simulací A-D .....	42
Obr. 21 Výsledné struktury simulací E-H.....	43



## 8 SEZNAM ZKRATEK

AL	Artificial Life – umělý život
CA	Cellular Automata – buněčné automaty
CPU	Central Processing Unit – centrální procesorová jednotka
GoL	Game of Life – Hra života
L-systémy	Lindenmayerovy systémy
SDSR	Structurally Dissolvable Self-Reproducing – strukturální, rozložitelný, samo-reprodukuje se
SOC	Self-Organized Criticality – sebe-organizující se kritičnosti
UI	Umělá Inteligence